

博士学位論文要旨等の公表

学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条に基づき、当該博士の学位の授与に係る論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

氏名	小田 久哉
学位の種類	博士（理工学）
報告番号	甲第7号
学位授与の要件	学位規程第4条第2項該当
学位授与年月日	平成21年3月21日
学位論文題目	「2次元AlGaAs系フォトリック結晶 スラブ線欠陥導波路の非線形光学特性の研究」
論文審査委員	主査 教授 山中 明生 委員 教授 石田 宏司 委員 教授 川辺 豊

学位論文要旨

光科学研究科 光科学専攻

氏名： 小田 久哉

2次元 AlGaAs 系フォトニック結晶スラブ線欠陥導波路の非線形光学特性の研究

2次元フォトニック結晶スラブ線欠陥導波路 (PC-WGs) は、従来の光導波路に比べ狭い領域に光を閉じ込めることができ、さらに光の群速度 v_g を小さくすることも可能である。そのため大きな非線形光学効果が期待されることから、非線形性を利用した光デバイスの作製も夢ではない。本研究では PC-WGs において初めて自己位相変調の観測に成功し、さらに自然放出および誘導ラマン散乱の観測にも初めて成功した。これらの結果から、将来の光集積回路に求められる超高速・超小型・低エネルギー動作の全光スイッチや、光増幅器の可能性について検討した。またデバイス応用での阻害要因となる2光子吸収についても、直接測定を行い評価した。

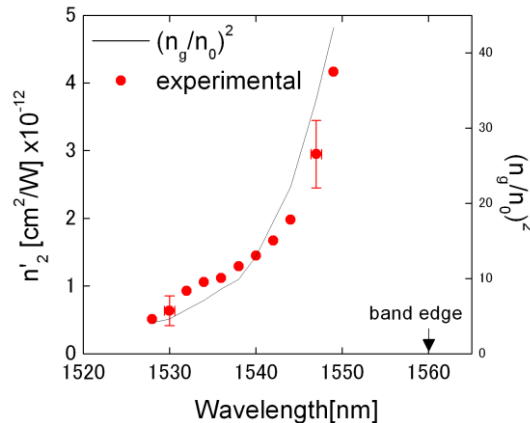


図 1: PC-WGs のバンド端付近での非線形屈折率 n_2' の波長依存性。

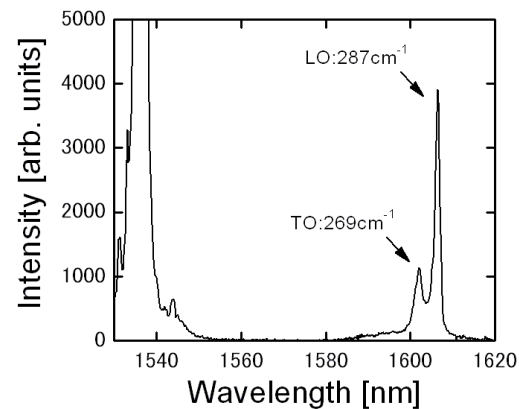


図 2: PC-WGs からのストークスラマン散乱。1,537nm のピークは励起レーザー光による。

光カー効果を用いた光スイッチ等の非線形デバイスでは、非線形屈折率 n_2' がパラメータとして重要になる。本研究では、伝播光の自己位相変調によるスペクトル広がりから n_2' を求めることにした。まず GaAs で作られた PC-WGs にパルス光 (時間幅 5ps) を入射させたところ、価電子帯から伝導帯への電子励起に伴う 2 光子吸収 (TPA) による伝播ロスが極めて大きいことが分かった。そこで TPA の影響を減らすため、電子のバンドギャップが大きな $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ でできた PC-WGs を使い、自己位相変調の観測に成功した。図 1 は非線形屈折率 n_2' の波長依存性で、線欠陥導波路モードのバンド端 (1560nm 付近) で n_2' が増大することが分かった。群速度との関係を見るために、群速度 v_g を time-of-flight 法により直接測定し、群屈折率 n_g を求め、 n_2' と比較し

た。図1のように n_2' の増大は $(n_g/n_0)^2$ に比例し、群速度低下により光カー効果が増大することが分った。なお n_0 は $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ の屈折率である。

PC-WGs における光増幅については既に報告があるが、本研究では光活性層の導入が不要な誘導ラマン散乱 (SRS) による光増幅を検討した。PC-WGs のラマン散乱は研究例が皆無であるので、まず自然放出ラマン散乱 (RS) の観測を試みた。試料は $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ PC-WGs、励起光源波長可変型の半導体レーザーを用いた。透過光を観測する配置 (前方散乱配置) で横波光学 (TO) フォノンと縦波光学 (LO) フォノンからのストークス RS の観測に成功した (図2)。PC-WGs では、バンド端 (1615nm 付近) で単一導波モードの状態密度が増え、RS 散乱効率の増大 (図3中の実線) が期待される。波長依存性を調べると、散乱効率が発散的に増加することが確認できた (図3)。

RS の結果から、励起波長 1537 nm で散乱効率 $5.5 \times 10^{-8} \text{cm}^{-1}$ となり、SRS の増幅係数は $g = 7.9 \times 10^{-9} \text{cm/W}$ と見積もられる。これより光増幅が期待できるので、パンプ-プローブ法によるラマンゲインの観測を試みた。試料は2光子吸収の影響を減らすため $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ PC-WGs とし、パンプ光として時間幅 5ps のパルス光、プローブ光として CW 光を用いた。それらの波長は、RS 散乱効率の大きい LO フォノンに合わせて 1537 nm と 1605.6 nm に設定し、プローブ光の増幅成分をロックインアンプで観測した。図4は、ロックインアンプ (LIA) の出力を試料内部のパンプレーザー光パワー (結合パワー) に対してプロットしたもので、線形からのずれが見られる。CW 光源を用いたため、増幅と断言できるほど大きな効果は得られていないが、指数関数的増加を仮定すると増幅係数 $g = 5.1 \times 10^{-9} \text{cm/W}$ が得られ、RS と矛盾のない結果となった。

本研究では、低群速度を利用した非線形光学効果の増大が可能である事、状態密度の増加を利用した誘導ラマン散乱による光増幅が可能なる事を見出した。デバイス展開の観点からは、光カー効果による交差位相変調を利用すると、2.8pJ で動作する $0.3 \times 0.3 \text{mm}^2$ サイズの超小型・超高速の全光スイッチが可能となる。また誘導ラマン散乱を利用すると、有効素子長が約 0.5mm の PC-WGs において、パンプパルスパワー4W (パルスエネルギー22pJ) に対し増幅度が約 6dB、net gain として約 3dB の値となる。これは光通信帯での超小型な増幅器の可能性を示唆するものである。すなわち2次元フォトニック結晶スラブ線欠陥導波路を用いた新しい光デバイスが可能である事が明らかとなった。

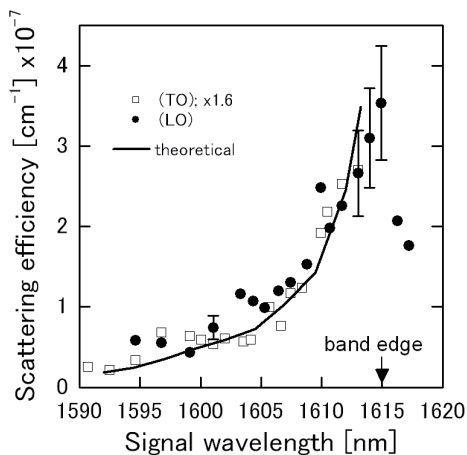


図3: 前方散乱配置でのTOフォノンとLOフォノンのラマン散乱効率の波長依存性。

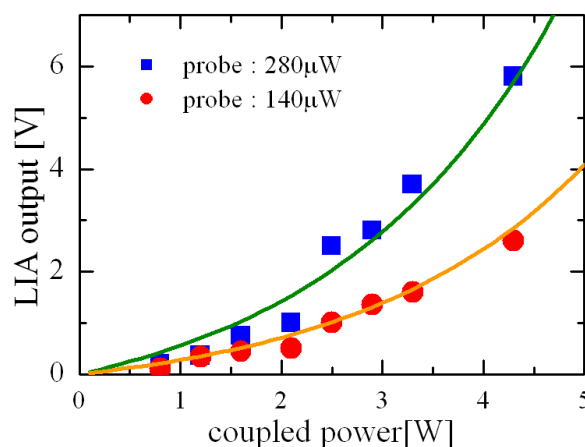


図4: 試料内部でのパンプレーザー光パワー (coupled power) に対するロックインアンプ (LIA) の出力。

論文審査の結果の要旨

本研究は、2次元フォトニック結晶スラブ線欠陥導波路の非線形光学効果を実験的に解明したものである。研究内容としては、(1)スラブ線欠陥導波路における2光子吸収とデバイス作製材料との関係、(2)伝播光の自己位相変調によるスペクトル広がり、スラブ線欠陥導波路中の光カー効果の関係、特に群速度の低下と光カー効果の増強について、(3)2次元フォトニック結晶における自然放出ラマン散乱および誘導ラマン散乱の世界初の観測の3部からなる。研究発表会では、これらについて詳細な実験の結果と将来のデバイス化の可能性について発表を行った。

2次元フォトニック結晶スラブ線欠陥導波路は、従来の光導波路に比べ狭い領域に光を閉じ込めることができ、さらに光の群速度も小さくすることも可能であり、その結果大きな非線形光学効果が期待されると理論的に予想されてきた。しかし微小なデバイスを高精度に作製する技術に加え、微小デバイスで非線形光学実験を行うことの困難さから、これまでほとんど研究報告がなかった。申請者は卓越した実験技術を駆使し、未解明である2次元フォトニック結晶スラブ線欠陥導波路での非線形効果を世界に先駆け実験的に実証するとともに、非線形性を利用した光デバイスの可能性についても明らかにした。(1)(2)の研究では、将来の光集積回路に求められる超高速・超小型・低エネルギー動作の全光スイッチを可能とする大きな光カー効果を見出し、さらにデバイス化の阻害要因となる2光子吸収についての知見を得た。(3)の研究は、2次元フォトニック結晶による自然放出光の制御と誘導ラマン散乱効率の増強を明らかにするとともに、誘導ラマン散乱の観測にも成功し、光活性層の導入が不要な光増幅器の可能性を示した。

発表後の質疑応答では、2光子吸収とデバイス作製材料との関係、研究で用いた非線形光学測定技術について、実用化に向けた研究についての質問があったが、いずれの点についても明快な説明がなされた。

以上の結果から、本論文は千歳科学技術大学大学院学則第25条および千歳科学技術大学学位規程の定めるところにより、博士(理工学)の学位を授与するのに十分との結論に達した。